

## Effets des systèmes en semis direct sur l'érosion hydrique et les rendements des cultures pluviales sur les Hautes Terres centrales malgaches

Noroso Christine RAZAFINDRAMANANANA<sup>1\*</sup>, Mamy Haingotiana RAKOTOALIBERA<sup>1</sup>  
Razafimiroe Randzavola Nirina REMAMY<sup>1</sup>, Harilala ANDRIAMANIRAKA<sup>1</sup>  
et Jean Marie DOUZET<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université d'Antananarivo, Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable (AT2D), Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, BP 175 101 Antananarivo, Madagascar

<sup>2</sup> Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Département PERSYST, UR AIDA, TA B 102/07, Avenue d'Agropolis, 34398 Montpellier cedex 5 France

\* Correspondance, courriel : [soamananjara@gmail.com](mailto:soamananjara@gmail.com)

### Résumé

Deux pratiques culturales, (i) semis direct sous couverture morte de résidus des cultures antérieures (SDm) et (ii) labour sans restitution des résidus des cultures (LAb), sont comparées, depuis six ans, dans un dispositif expérimental de mesure de l'érosion à Andranomanelatra-Antsirabe, Haute Terres centrales malgaches, sur un sol ferrallitique à caractère andique. Le système de culture est basé sur une rotation biennale de maïs (*Zea mays*. L) + haricot (*Phaseolus vulgaris*. L)/riz pluvial (*Oriza sp.* L). Les résultats obtenus ont montré l'effet positif des systèmes en semis direct sur couverture végétale pour réduire d'une manière significative l'érosion hydrique. Les pertes en terre moyennes durant six ans des mesures sur les parcelles en semis direct et labourées sont respectivement de 0,1 et 7,1 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. Une tendance similaire est constatée sur les taux du ruissellement ; les taux du ruissellement sur les parcelles labourées sont huit fois plus élevés que ceux observés sur les parcelles en semis direct. Quant aux biomasses totales produites (grains plus résidus de cultures), aucune différence significative entre traitements n'a été observée. Pour conclure, les systèmes en semis direct sous couverture végétale permanente constituent une technique prometteuse pour la conservation durable des sols en versant de collines, tout en permettant des productions comparables aux parcelles labourées.

**Mots-clés :** *conservation du sol, pertes en terre, ruissellement, couvertures végétales, maïs, haricot, riz pluvial.*

### Abstract

**Effect of direct seeding mulch-based cropping system (DMC) on water erosion and rainfed agriculture yield in Madagascar central highlands**

Two treatments, based on direct seeding mulch-based cropping system (DMC) and conventional tillage system without restitution of residue are compared for six years in the experiment design in Andranomanelatra, central Highlands of Madagascar.

The soil at this site is an andic Dystrustept. Systems are based on an annual rotation of maize (*Zea mays*. L) + common bean (*Phaseolus vulgaris*. L) and rainfed rice (*Oriza sp.* L). The result showed that soils losses under no tillage system were less than those under conventional tillage system. Average soil losses generated from no tillage and tillage system during the experiment were 0.1 and 7.1 t.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup> respectively; a similar trend is observed on runoff rates. Runoff rates recorded in tillage treatment are eight times greater than those under no-tillage system. About, the total biomass produced (seed and crop residues) per treatment, no significant difference was observed between a conventional and no tillage system. Definitively, direct seeding systems are a promising technique for sustainable soil management, while ensuring production comparable to the tillage systems in the long term.

**Keywords :** *soil conservation, soils losses, runoff, crop mulching, corn, bean, rainfed rice.*

## 1. Introduction

Madagascar est un pays à vocation agricole, l'Agriculture contribue pour 28,3 % au produit intérieur brut (PIB) du pays et emploie environ 70 % de la main d'œuvre active et près de 75 % de la population malgache, est estimée à 22,3 millions en 2013-2014, habitent dans les zones rurales [1]. Selon la Banque mondiale [2], au cours de dernières années, une augmentation de la population d'environ 85 % est recensée à Madagascar. Dans les grandes zones de production agricole, surtout sur les Hautes Terres centrales malgaches, cette pression démographique entraîne de problèmes de gestion de sols agricoles qui vont de pair avec l'insécurité alimentaire, la paupérisation et par voie de conséquence entrave la croissance économique. De même, les surfaces planes présentant un grand intérêt pour l'agriculture, telles que les bas-fonds plus fertiles et les *baiboho*, qui sont des alluvions fluviales déposés le long de cours d'eau [3] ne suffisent plus pour subvenir au besoin de la population. La mise en culture de sols en versant de colline, appelés localement sols de « *tanety* » [4] est incontournable, car ils constituent la seule surface potentielle pour assurer l'augmentation de la production agricole. Ils représentent plus de 50 % de la surface agricole utile de la Région [5]. Or, dans la majorité de cas, la fertilité de sols en versants des collines est faible. Elle tend à diminuer au fil du temps [6], des multiples raisons pourraient avancer pour expliquer leur déclin. Celle la plus probable est l'effet du phénomène d'érosion hydrique.

En effet, Madagascar est un pays où le risque de l'érosion hydrique n'est pas négligeable. L'effet combiné de l'agressivité de la pluie tropicale, l'absence de la couverture végétale durant une certaine période de l'année et la pratique de labour itératif sans restitution de résidus des cultures concourent à fragiliser le *tanety*. L'accroissement de l'agriculture pluviale (promotion de l'agriculture sur *tanety*) et le maintien des capacités productives des agrosystèmes constituent donc les grands enjeux des agricultures familiales d'Afrique et de Madagascar [7]. Pour pallier ce problème, les systèmes des cultures en semis direct sur couvertures végétales permanentes (systèmes SCV) ont été testés dès le début des années 1990 à Madagascar, ils ont pour principal objectif d'améliorer la fertilité de sols de *tanety*, associant une gestion intégrée de sols en versants des collines [8]. Ces systèmes SCV obéissent aux trois principes de l'agriculture de conservation [9]: (i) l'absence de perturbation du sol (suppression du labour, de sarclage, du binage etc.); (ii) la protection de sols par une couverture végétale permanente; et (iii) la rotation culturale associant céréales et légumineuses. Les études antérieures réalisées à Madagascar montrent des multiples effets bénéfiques des systèmes SCV. En fait, ils limitent le développement des mauvaises herbes et maintiennent l'humidité du sol [10]; augmentent la teneur en matière organique du sol [11]; limitent l'érosion hydrique [12, 13]; et augmentent et améliorent la diversité faunistique et floristique du sol [14, 15]. Dans ce contexte, ils constituent un moyen efficace pour lutter contre la dégradation du sol et participe à améliorer sa fertilité [16].

Mais les revues de la littérature scientifique, montrent que les informations quantitatives et les études à long terme (plus de 5 ans) traitant l'effet des systèmes SCV, sur les rendements des cultures et l'érosion hydrique sur les Hautes Terres centrales malgache sont rares. La question scientifique étudiée ici est la suivante : *dans le contexte spécifique des Hautes Terres centrales malgaches sur sols de Tanety à caractère andique, les systèmes SCV ont-ils des effets significatifs sur la conservation des sols en versants de collines et/ou les rendements des cultures durant les six années des mesures?* Cette étude originale pour la Grande-Ile a pour objectif principal de comparer le taux d'érosion (c'est-à-dire les pertes en terre et les taux du ruissellement) et la quantité totale de biomasse produite (partie récoltable et non récoltable) entre les systèmes SCV et labourés durant plusieurs années des mesures. Cette activité de recherche reprend les données collectées sur un même dispositif expérimental d'érosion à Andranomanelatra-Antsirabe depuis six campagnes culturales consécutives.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Description du dispositif expérimental

L'essai est conduit à Andranomanelatra, situé à 15 km au Nord-Est d'Antsirabe (19°53'46" Sud, 47°14'48" Est, 1645 m d'altitude). La pluviosité et la température moyennes annuelles, enregistrées entre 2004 et 2009 sont respectivement de 1373 mm et 17°C. D'après la classification climatique de Köppen, le site d'Andranomanelatra est doté d'un climat subtropical humide avec un été doux [17]. Ce climat est marqué par une alternance d'une saison froide et sèche de mai à septembre et d'une saison humide et chaude d'octobre à avril. D'après [18], le sol d'Andranomanelatra est un sol ferrallitique à caractère andique. Le détail des caractéristiques du sol à l'état initial est présenté dans la partie résultat de l'article en cours (**Tableau 1**). Le dispositif expérimental a été mis en place en novembre 2004, sur un versant exposé au nord, avec une pente variant de 10 à 13 %, et a été installé sur une jachère spontanée à *Cynodon dactylon* d'une dizaine d'années. Le dispositif expérimental est composé de 16 parcelles élémentaires de 48 m<sup>2</sup> chacune, placées les unes à côtés des autres. Les parcelles sont groupées en quatre blocs randomisés de façon à avoir 4 répétitions et 4 traitements. Pour mesurer le taux d'érosion, de parcelles d'érosion (21 m<sup>2</sup>) ont été intégrées sur chaque parcelle élémentaire. Elles sont ceinturées par de tôles légèrement enfoncées dans le sol pour éviter les entrées d'eau de l'extérieur et les sorties des eaux du ruissellement de l'intérieur. Par le biais d'un exutoire-tuyau, les eaux ruisselées dans les parcelles d'érosion sont déversées directement dans des fûts collecteurs équipés de partiteurs 1/5 [19]. Une partie de chaque parcelle élémentaire n'est pas ceinturée de tôles, afin de réaliser des prélèvements et mesures sans perturber l'autre partie de la parcelle, en occurrence les rendements des cultures.

### 2-2. Traitements étudiés

Une rotation biennale est appliquée sur toutes les parcelles, en première année le maïs (*Zea mays L.*) est associé au haricot (*Phaseolus vulgaris. L.*), et en deuxième année, le riz pluvial (*Oriza sp L.*) est cultivé en pure. Le dispositif expérimental comporte quatre traitements, faisant varier travail du sol et restitutions de résidus de cultures. Mais dans la présente étude deux traitements sont étudiés à savoir :

- le traitement LABe : les parcelles LABe sont labourées manuellement à l'aide de l'*angady* (une sorte de bêche avec une lame de 30-40 cm de long et 15 cm de large, munie d'une longue manche en bois de 1 à 1,5 m de long) jusqu'à 20 cm de profondeur et les résidus des cultures sont exportés de parcelles ;
- le traitement SDm : les parcelles SDm ne sont pas labourées et les résidus des cultures précédentes sont coupés et laissés en surface.

### 2-3. Itinéraire technique

Afin d'évaluer l'effet du mode de gestion et de l'année, durant la période d'expérimentation, les deux traitements comparés reçoivent le même niveau d'intrants. L'épandage de fumier de bovin à raison de 5 t.ha<sup>-1</sup> et de dolomie à raison de 500 kg.ha<sup>-1</sup> est effectué au moment du labour pour le traitement LABe et après les coupes des résidus des cultures pour le traitement SDm. Un apport de 300 kg.ha<sup>-1</sup> de N<sub>11</sub>P<sub>22</sub>K<sub>16</sub> est effectué au semis ; et deux apports sont effectués respectivement au moment de la levée (50 kg.ha<sup>-1</sup>) et 40 jours après la levée (50 kg.ha<sup>-1</sup>). Les semences sont traitées avec du Gaucho T45WS à 5 g.kg<sup>-1</sup>. Les graines du riz sont ensuite mises en poquets (5 à 7 grains) avec des espacements de 20 cm entre lignes et 20 cm entre les poquets. Pour l'association maïs/ haricot, les graines sont toujours mises en poquet, avec des espacements de 1 m entre lignes et 40 cm entre les poquets pour le maïs ; entre les lignes de maïs se trouvent deux lignes de haricots à 40 cm et des poquets à 20 cm.

### 2-4. Prélèvements et mesures sur terrain

#### 2-4-1. Prélèvement du sol

L'échantillonnage s'est fait sur un dispositif expérimental avant l'expérimentation, un prélèvement du sol en place est effectué à l'aide d'un cylindre métallique à différentes profondeurs (0-5, 5-10, 10-20, 20-30 et 30-40 cm). Afin de tenir compte l'hétérogénéité du terrain, pour chaque parcelle, deux points de prélèvements sont réalisés, respectivement en haut et en bas de la pente. Les échantillons des sols sont utilisés pour déterminer les caractéristiques du sol en place du dispositif expérimental à l'état initial.

#### 2-4-2. Mesures de caractéristiques des pluies

L'expérimentation est réalisée sous condition naturelle, les données sur la hauteur des pluies (mm) et leur intensité maximale (mm.h<sup>-1</sup>) sont recueillies sur une station météorologique automatique de type Enerco 408 GSM de Cimel Technologies, située à côté du dispositif expérimental d'érosion à Andranomanelatra-Antsirabe. La station Cimel répond aux recommandations de l'organisation mondiale de la météorologie. La station est un poste autonome avec un capteur solaire, une mémoire interne et un système de transfert des données sur un ordinateur.

#### 2-4-3. Mesures des taux du ruissellement et des pertes en terre

Après chaque événement pluvial érosif, des mesures du ruissellement et de récupération de particules solides sont effectuées systématiquement. L'opération de mesures du ruissellement est réalisée avant le nettoyage du fût. La hauteur d'eau collectée dans le fût est mesurée. Le rapport entre le volume ruisselé (L) et la superficie de la parcelle d'érosion (m<sup>2</sup>) donne le ruissellement (mm). La hauteur du ruissellement est ensuite cumulée sur une campagne et rapportée à la hauteur des pluies pour donner les taux du ruissellement, exprimés en mm.mm<sup>-1</sup>. Après homogénéisation manuelle du fût, deux échantillons de 1,5 L représentatifs de la solution ruisselée sont prélevés dans chaque fût. Les échantillons sont ensuite passés au filtre de type millipore d'une porosité de 0,45 µm. Les filtres sont ensuite séchés à l'étuve réglé à 105°C pendant 24 heures. Le rapport entre le poids des sédiments secs et la surface d'une parcelle d'érosion donne les pertes en terre, exprimées en t.ha<sup>-1</sup>.

#### **2-4-4. Mesure du taux de la couverture végétale**

Le taux de la couverture végétale est évalué par la méthode de la grille qui consiste à placer un cadre placé à deux emplacements par parcelle. Un cadre de 1,1 m<sup>2</sup>, sur lequel sont tendus des fils se croisant tous les 10 cm, est utilisé. Cette grille est disposée horizontalement au-dessus de la parcelle, et la nature de ce qui se trouve au point situé à la verticale de chaque intersection est notée (sol nu, résidus de différentes natures, plante vivante cultivée ou non) [20, 21]. Pour suivre l'évolution du taux de couverture, deux mesures sont effectuées durant les trois premières campagnes culturales (A1, A2, et A3). La première mesure est effectuée à partir de soixante cinquième jours après le semis du riz ou une trentaine de jours après le semis du maïs-haricot. La deuxième mesure a lieu généralement vers la fin de la pleine saison des pluies (entre mi et fin janvier).

#### **2-4-5. Mesure de la biomasse végétale**

La méthode de la récolte intégrale ou méthode de surface [22] est appliqué pour mesurer les biomasses aériennes, sur une parcelle de 48 m<sup>2</sup> pour l'association maïs-haricot, sur une parcelle de 36 m<sup>2</sup> pour le riz. Le poids de la matière fraîche est mesuré sur terrain et un aliquote est recueilli, et mis à l'étuve réglée à 60°C durant 72 heures. Les parties récoltables (graines) et non récoltables (tiges et feuilles) sont séparées.

### **2-5. Analyses au laboratoire**

Les analyses physico-chimiques sont effectuées au laboratoire de Radio-isotope (LRI) à Ampandrianomby-Antananarivo-Madagascar et au laboratoire de l'UMR Eco & Sols (Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols)-Montpellier -France. Le pH 1M est mesuré sur des suspensions de sols dans une solution, avec une proportion en poids égal à 1/2,5 ; la densité apparente est calculée après séchage d'échantillons du sol à l'étuve à 105°C durant 48 heures ; l'analyse granulométrie est réalisée selon la méthode de la pipette de Robinson ; la méthode proposée par [23] est employée pour déterminer la stabilité structurale des agrégats ; le carbone total (C<sub>tot</sub>) et l'azote total (N<sub>tot</sub>) est mesurés par combustion au microanalyseur élémentaire CHN Fisons/Carlo Erba NA 2000, Milano, Italy.

### **2-6. Traitements des données statistiques**

L'analyse statistique des données est effectuée à l'aide du logiciel XLSTAT. L'effet particulier des systèmes de culture sur les rendements de cultures est analysé statistiquement par une analyse de variance à deux critères de classification : (i) effets du mode de gestion et (ii) de l'année [24]. Les données sont comparées entre elles par le test de Tuckey (test de comparaisons multiples pour la variable moyenne). Pour l'acceptabilité ou le rejet de l'hypothèse nulle, le seuil de probabilité est fixé à 5 %.

## **3. Résultats**

### **3-1. Caractéristiques du sol en place**

Les résultats montrent que le pH du sol est légèrement acide. La densité apparente est faible, avec une valeur moyenne inférieure à 1t.m<sup>-3</sup>. La texture de l'horizon de surface est argileuse, avec une teneur en éléments fins (argiles + limons fins) de l'ordre de 75 %. Le résultat du test de stabilité structurale indique une forte teneur en macro agrégats qui représentent plus de 75 % de l'ensemble de fractions d'agrégats du sol, alors que les méso agrégats et micro agrégats représentent respectivement 20 et 5 % de cette fraction. L'horizon superficiel du sol est également riche en carbone organique, avec une teneur moyenne de 38 g C.kg<sup>-1</sup> sol (*Tableau 1*).

**Tableau 1 : Caractéristiques du sol avant la mise en place du dispositif expérimental**

Paramètres mesurés	Unités	Valeurs
pH	-	5,2
Densité apparente	t.m <sup>-3</sup>	0,96
<b>Granulométrie</b>		
- Argiles : 0-2 µm	%	41
- Limons fins : 2-20 µm	%	34
- Limons grossiers : 20 à 50 µm	%	4
- Sables fins : 50 à 200 µm	%	11
- Sables grossiers : 200 à 2000 µm	%	10
<b>Distribution des agrégats stables</b>		
- Macroagrégats : 200-2000 µm	g.kg <sup>-1</sup> sol	755
- Mésoagrégats : 20-200 µm	g.kg <sup>-1</sup> sol	201
- Microagrégats : 0-20 µm	g.kg <sup>-1</sup> sol	44
<b>Carbone (C) organique total</b>	gC.kg <sup>-1</sup> sol	38
<b>Azote (N) total</b>	gN.Kg <sup>-1</sup> sol	3

### 3-2. Caractéristiques des pluies

Les caractéristiques des pluies durant la période d'expérimentation sont résumées dans le **Tableau 2**. L'analyse de la pluviosité annuelle a montré une variabilité annuelle de la hauteur de la pluie, allant de 905 (A5) à 1540 mm (A4). Le pic de l'intensité des pluies (sur un événement le plus érosif de l'année) au cours d'une saison des pluies varie aussi suivant l'année, entre 105 (A3) et 170 (A4) mm.h<sup>-1</sup>. Quant au nombre de jours des pluies, il varie de 157 (A1) à 227 (A4) jours.

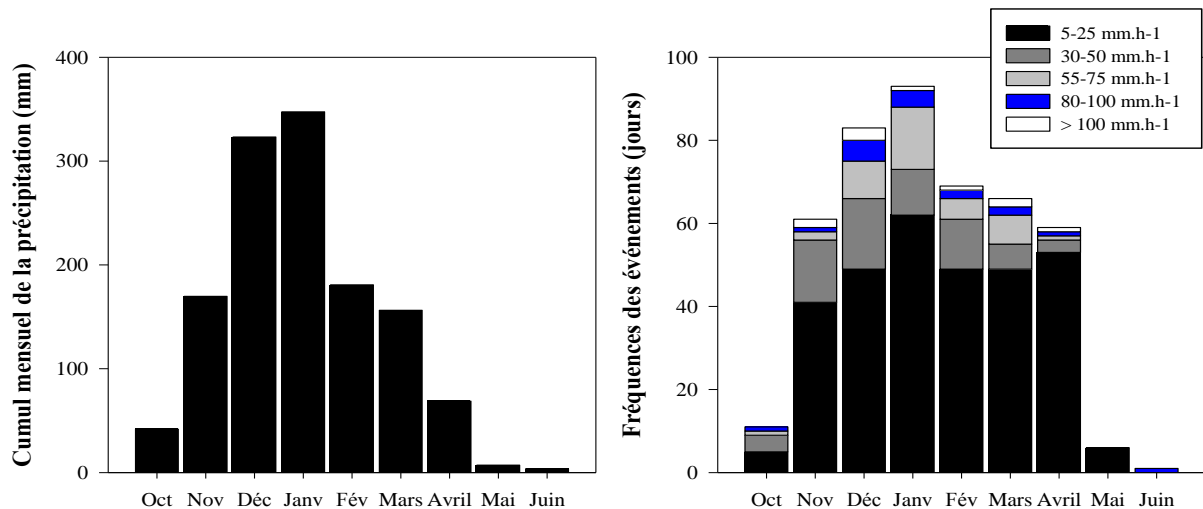
**Tableau 2 : Caractéristiques des pluies durant la période d'essai**

Paramètres	Unités	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Cumul des pluies	mm	1069	1540	1059	1520	905	1262
Intensité des pluies*	mm.h <sup>-1</sup>	150	115	105	170	115	125
Jours des pluies	jours	157	195	220	227	188	198

\* Intensité des pluies enregistrée pour un événement le plus érosif durant une saison des pluies.

A1, A2, A3, A4, A5 et A6 : les six années des mesures

La **Figure 1** (à gauche) montre l'histogramme de distribution moyenne mensuelle du cumul de la précipitation durant la période d'essai.



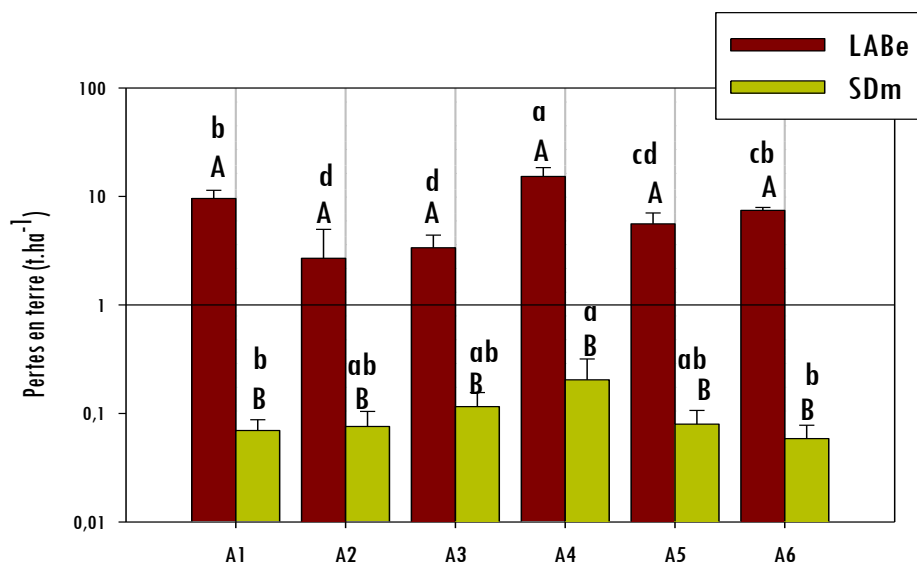
**Figure 1 :** *Histogrammes de cumul mensuel des pluies (à gauche) et de fréquence mensuelle de l'intensité maximum de pluies durant la période d'expérimentation (à droite)*

L'histogramme met en évidence le caractère monomodal du régime des pluies. En moyenne, plus de la moitié (52 %) des précipitations cumulées durant la saison des pluies sont enregistrées entre décembre et janvier. La période la plus érosive de la saison des pluies coïncide également à cette période, en moyenne plus de 52 % des événements d'intensité maximum supérieure à 55 mm.h<sup>-1</sup> se situent entre décembre et janvier (**Figure 1** à droite).

### 3-3. Taux d'érosion

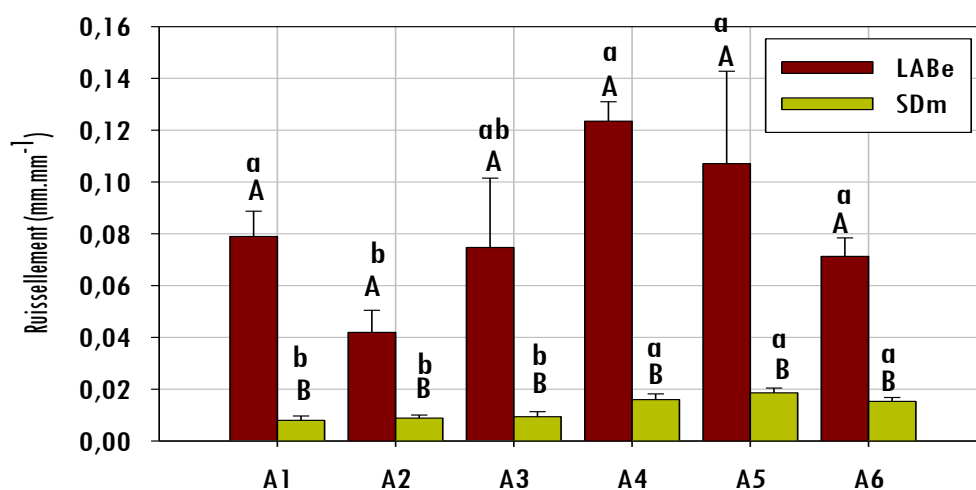
Les résultats concernant les pertes en terre durant l'expérimentation sont repris dans **la Figure 2**. Durant six années des mesures, les pertes en terre sur les parcelles LABe sont nettement supérieures à celles enregistrées sur les parcelles SCVm. Les pertes en terre moyennes durant la période d'expérimentation sont de  $7,33 \pm 3,44$  t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> sur les parcelles LABe alors que sur les parcelles SDm, elles sont de  $0,10 \pm 0,04$  t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. Quant à l'évolution des pertes en terre au cours du temps ; sur les parcelles LABe, une variabilité interannuelle est enregistrée, les pertes en terre varient de 2,70 (A2) à 15,29 (A4) t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>, alors sur les parcelles SDm, d'une manière générale la variation est très faible (entre 0,50 et 3,20 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>), bien qu'il ait une différence significative entre les saisons des pluies en A4 et en A2/A6.

Concernant les taux du ruissellement durant l'expérimentation les résultats obtenus (**Figure 3**) montrent clairement l'existence d'une différence significative entre les deux traitements comparés (LABe vs SDm). La moyenne des taux du ruissellement sur les parcelles LABe est huit fois (8 %) plus importante que celle des parcelles SDm (1 %). En termes d'évolution des taux du ruissellement durant la période d'essai sur les parcelles LABe, d'une manière générale aucune différence significative n'est observée, sauf pour les saisons des pluies A2 et A4 où une différence significative est constatée. Pour les parcelles SDm, durant les trois premières saisons des pluies, les taux du ruissellement sont faibles (1 %) par rapport à ceux de trois dernières années des mesures (2 %). Quoi qu'il en soit, les taux restent négligeables durant la période d'essai.



**Figure 2 :** Pertes en terre durant la période d'essai (à l'échelle logarithmique)

Les lettres majuscules se rapportent aux différences entre LAbE et SDm pour une même année, les lettres minuscules indiquent la différence entre le même traitement (LABe ou SDm) au cours de la période d'expérimentation. Une même lettre indique une absence de différence significative au seuil de 5% d'après le test de Tukey.



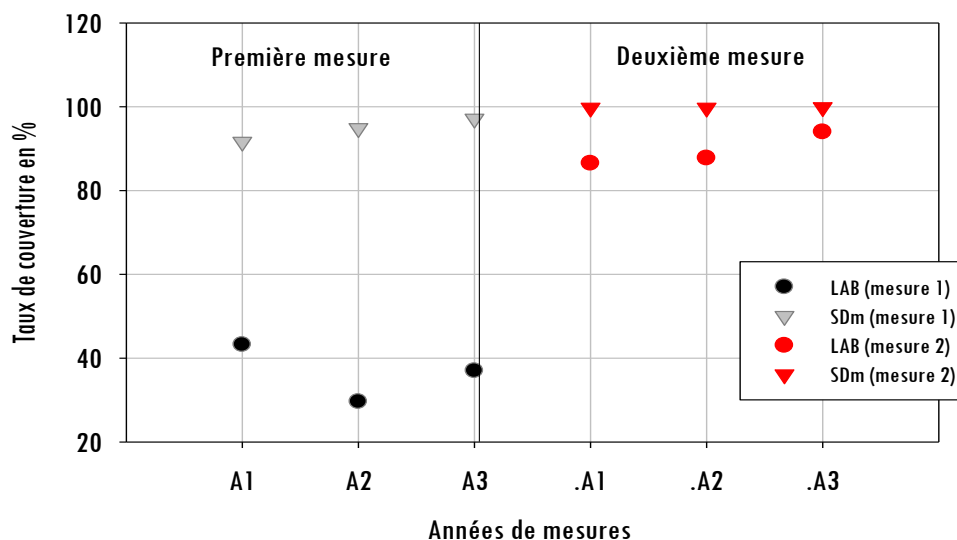
**Figure 3 :** Taux du ruissellement durant la période d'expérimentation

Les lettres majuscules se rapportent aux différences entre LAbE et SDm pour une même année, les lettres minuscules indiquent la différence entre le même traitement (LABe ou SDm) au cours de la période d'expérimentation. Une même lettre indique une absence de différence significative au seuil de 5% d'après le test de Tukey.



### 3-4. Taux de la couverture végétale

L'évolution des taux de la couverture végétale est présentée dans la **Figure 4**.



**Figure 4 :** Evolution des taux de la couverture végétale suivant le mode de gestion

Les mesures des taux de couverture végétale effectuées jusqu'à 70 jours après le semis (semis effectué entre novembre et début décembre) montrent que les taux de couverture du sol par la végétation sur les parcelles LABe varie entre 29 et 43 %. En revanche, sur les parcelles SDm, dès le début du prélèvement, le taux moyen de couverture du sol par la végétation est plus de 92 %. Les mesures effectuées à partir de 73 jours après le semis montrent que les taux de couverture du sol par la végétation sur les parcelles LABe dépassent 75 %, et sur les parcelles SDm, il peut aller jusqu'à 100 %.

### 3-5. Rendements des cultures

Les rendements des cultures obtenus sur une période d'essai sont présentés dans le **Tableau 3**. Les rendements en grains et en pailles du riz montrent une absence de différence significative entre les deux traitements comparés, sauf pour les pailles du riz durant la première campagne culturale (A1), où les rendements sur les parcelles labourées sont nettement supérieurs par rapport à ceux obtenus sur les parcelles SDm. Les rendements en grain de haricot sont supérieurs pour le traitement SDm que pour le traitement LABe, sauf à la fin de l'expérimentation, où une différence significative est signalée entre eux. Pour les rendements en pailles, d'une manière générale, une absence de différence significative est observée sur les deux traitements, sauf pour la quatrième campagne culturale (A4), où les rendements en pailles sur les parcelles SDm sont plus importants. Pour le maïs, les rendements en grains et en pailles ne diffèrent pas significativement entre traitements au cours de la période d'essai. En termes d'évolution des rendements des cultures, pour les deux traitements étudiés, les rendements en grains du riz et de maïs connaissent une augmentation au fil du temps. Une observation similaire est constatée au niveau des rendements en pailles. Contrairement à ce qu'on a pu obtenir sur les rendements en grains de haricots, où une diminution est enregistrée. Pour les rendements en paille du haricot, ils sont constants, sauf pour la quatrième campagne culturale (A4) où une diminution de rendements est enregistrée.

**Tableau 3 : Influence du mode de gestion du sol sur la quantité de la biomasse totale produite pour le riz, le maïs et le haricot en t.ha<sup>-1</sup>**

Années	Culture	Biomasse	LABe	SDm
A1	RIZ	Grains	1,47 ± 0,49 <b>a B</b>	0,76 ± 0,31 <b>a C</b>
A3			1,47 ± 0,10 <b>a B</b>	1,80 ± 0,28 <b>a B</b>
A5			3,00 ± 0,26 <b>a A</b>	3,39 ± 0,36 <b>a A</b>
A1		*Paille	3,44 ± 0,42 <b>a A</b>	1,45 ± 0,39 <b>b C</b>
A3			6,42 ± 2,64 <b>a A</b>	6,63 ± 2,05 <b>a A</b>
A5			3,64 ± 0,48 <b>a A</b>	3,75 ± 0,44 <b>a B</b>
SOUS-TOTAL			19,43	17,77
A2	HARICOT	Grains	0,49 ± 0,20 <b>b A</b>	0,86 ± 0,06 <b>a A</b>
A4			0,32 ± 0,05 <b>b A</b>	0,69 ± 0,10 <b>a B</b>
A6			0,23 ± 0,02 <b>a B</b>	0,26 ± 0,05 <b>a C</b>
A2		*Paille	0,87 ± 0,16 <b>a A</b>	0,88 ± 0,15 <b>a A</b>
A4			0,34 ± 0,08 <b>b B</b>	0,55 ± 0,09 <b>a B</b>
A6			0,83 ± 0,13 <b>a A</b>	0,89 ± 0,23 <b>a A</b>
SOUS-TOTAL			3,09	4,12
A2	MAIS	Grains	1,84 ± 0,54 <b>a B</b>	1,70 ± 0,21 <b>a B</b>
A4			1,84 ± 0,29 <b>a B</b>	2,92 ± 1,07 <b>a B</b>
A6			3,19 ± 0,43 <b>a A</b>	3,01 ± 0,82 <b>a A</b>
A2		*Paille	2,82 ± 0,48 <b>a B</b>	2,52 ± 0,43 <b>a B</b>
A4			5,41 ± 1,43 <b>a A</b>	6,57 ± 1,21 <b>a A</b>
A6			5,08 ± 0,71 <b>a A</b>	5,88 ± 0,88 <b>a A</b>
SOUS-TOTAL			20,18	22,59
TOTAL			42,70	44,48

Les lettres minuscules comparent les deux modes de gestion pour une même année, les lettres majuscules montrent l'évolution des rendements durant la période d'essai pour le même traitement et même culture. Les mêmes lettres ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % ( $p < 0,05$ ) selon le test de Tuckey  
**\*Paille** : ce sont les produits non récoltables (feuilles, tiges, branches etc.), qui peuvent être restitués au sol.

## 4. Discussion

### 4-1. Effets de la restitution des résidus des cultures sur l'érosion hydrique.

La connaissance de la bonne pratique agricole est indispensable pour la conservation durable des sols agricoles. Cette étude a permis de mettre en évidence une pratique permettant de limiter la dégradation du sol sur les versants des collines (*Tanety*). En effet, dans la présente étude, la restitution des résidus des cultures en surface permet de contrôler l'érosion hydrique sur les sols ferrallitiques à caractère andique de Hautes Terres centrales malgaches. Les pertes en terre et les taux du ruissellement sur les parcelles SDm sont négligeables, voire nuls, par rapport à ceux sur les parcelles LABe. Cette observation est valable durant les six saisons des pluies consécutives et quelques soient les types des plantes cultivées (riz en pur ou association maïs-haricot).

L'effet positif de systèmes SDm pour contrôler l'érosion hydrique est aussi bien visible dès la mise en place de la pratique culturale. Ces résultats sont en accord avec ceux observés par [25-29]. Deux paramètres déterminants permettent de mieux expliquer la différence du taux d'érosion entre les deux modes de gestion. *Primo*, la présence de la couverture végétale permanente et la restitution des résidus en surface qui assurent une protection quasi totale du sol contre l'impact des gouttes des pluies et qui constituent une barrière de la vitesse du ruissellement [30, 31]. Dans la présente étude, pendant la période la plus érosive de l'année (décembre et janvier), le pourcentage moyen de surface couverte par la végétation sur les parcelles SDm est supérieur à 90 %, contre 30 % sur les parcelles LABe. Dans la littérature, le seuil des taux des couvertures végétales considéré comme nécessaire pour protéger efficacement la surface du sol contre l'agressivité des pluies est généralement supérieur à 40 % selon [32]; 55% selon [33]; voir plus de 70 % d'après [34, 35]. La vitesse d'infiltration de l'eau y est également en jeux. La mesure effectuée sur le même dispositif par [36] montre une différence significative entre la vitesse d'infiltration de deux parcelles comparées (LABe vs SDm), au profit des parcelles SDm.

*Secundo*, le non retournement du sol participe également à la réduction des taux d'érosion sur les parcelles SDm. L'absence de perturbation du sol limite la quantité de particules solides disponibles à la surface du sol qui pourraient être transportées par le ruissellement vers l'exutoire. Il en résulte que les taux du ruissellement annuel moyens et les pertes en terre annuelles moyennes y restent faibles, voire nuls, quelles que soient les caractéristiques des pluies durant la période d'expérimentation. Ce qui n'était pas le cas des parcelles LABe, où les taux du ruissellement annuel moyen et les pertes en terres annuelles moyennes varient en fonction des caractéristiques annuelles des pluies. Ce taux d'érosion sur parcelles labourées est surtout lié à l'intensité maximale des pluies; puisque le nombre de jours de pluie pendant une saison pluvieuse et la hauteur de pluie n'ont pas d'influence majeure sur le taux d'érosion (**Tableau 2 et Figure 1**). Par exemple, au cours de la quatrième saison des pluies (A4), les averses érosives ayant une intensité maximale supérieure à 55 mm.h<sup>-1</sup> sont plus importantes (**Figure 1**), il en résulte que les pertes en terre moyennes durant cette saison de pluies sont plus élevées que pour les autres années de mesures. Lors de la quatrième saison pluvieuse (A4), les pertes en terre sur les parcelles labourées atteignent jusqu'à plus de 15 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. Ces pertes en terres dépassent le seuil de tolérance classique accepté dans les pays tropicaux, qui est estimé entre 2,2 et 12 t.ha<sup>-1</sup>, avec une moyenne de l'ordre de 10 à 11 t.ha<sup>-1</sup> [37]. Le seuil de tolérance est défini par Wischmeier & Smith (1978) comme *«a maximum level of soil erosion that will permit a high level of crop productivity to be obtained economically and indefinitely»*. C'est une raison pour laquelle les conditions climatiques contrastées enregistrées (**Tableau 2**) durant la période d'expérimentation n'ont pas d'effet notable sur le taux d'érosion des parcelles SDm (différence de 3 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour les années moins et plus érosifs). Alors que sur les systèmes LABe, la démarcation des pertes en terre entre les années la moins (A2) et la plus érosive (A4) est bien visible (13 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>).

#### 4-2. Effets de la restitution des résidus des cultures sur les rendements en biomasse végétale

Après une longue année des mesures (six ans), le mode de gestion n'a pas d'effet significatif sur la production de la biomasse totale; bien qu'il y ait des exceptions sur les rendements en grains du haricot sur SDm (plus élevés au début de l'expérimentation, en deuxième et en quatrième année). L'absence de la différence significative de rendements entre les deux systèmes comparés (Sdm vs LABe) laisse supposer que dans le contexte étudié : cas du sol ferralitique argileux à caractère andique, stable, filtrant, riche en matière organique (**Tableau 1**), et fortement fertilisé, les systèmes SDm n'ont pas d'effet dépressif sur les cultures, surtout dans la production du riz et du maïs.

L'avantage tiré des systèmes SDm réside au niveau de la quantité de la biomasse restituée au sol, plus importante par rapport aux systèmes conventionnels de labour avec exportation des résidus des cultures (LABe). En se référant, aux résultats de l'étude en cours, la totalité de la quantité de la biomasse restituée est de 29,12 t.ha<sup>-1</sup> soit une moyenne annuelle de l'ordre de 4,9 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>, contre 0 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour les systèmes LABe. La restitution de ces résidus de cultures va améliorer le statut organique des sols sous-systèmes SDm [11, 38]. Par rapport aux études antérieures sur les rendements des cultures en systèmes SCV et labourés, les résultats en cours vont à l'encontre de la majorité. [39] a trouvé une augmentation des rendements moyens en riz pluvial dès la première année de transition en systèmes SCV et par la suite une augmentation progressive au fil du temps; [40] a avancé qu'à partir de la troisième année de la mise en place des systèmes SCV, une augmentation significative des rendements en riz pluvial de 10 à 15 % est constaté par rapport au pratique traditionnel de labour. Par suite de la divergence des résultats obtenus; les effets des systèmes SCV et de labour conventionnel sur les rendements des cultures restent encore une question complexe, et méritent une mise en place des dispositifs expérimentaux sur des milieux contrôlés et des milieux paysans ; tout en tenant compte les diversités pédoclimatiques, les natures des cultures, les types d'association et de rotation, les niveaux de la fertilisation (sans apport, faibles, moyens et forts), et la toposéquence. Des études plus fines sur la croissance et le développement des plantes cultivées seraient également sollicitées.

## 5. Conclusion

Après six années d'études de rotation biennale maïs+haricot/riz sur la station expérimentale à Andranomanelatra-Antsirabe, Madagascar, il a été déduit que les systèmes des cultures en semis direct sous couverture végétale permanente (SDm) sont une des pratiques agricoles proposées pour une gestion conservatoire des sols et des eaux. Ils réduisent d'une manière significative le ruissellement et les pertes en terre. L'effet de la pratique est plus efficace sous des pluies intenses. L'adoption d'un tel système est considérée comme un outil prometteur pour limiter la dégradation du sol sur le continuum colline bas-fonds, où cet endroit est régulièrement confronté aux problèmes d'inondation, d'ensablement (zones basses), d'érosion (zones des montagnes) et du cyclone (en moyenne, trois à quatre cyclones touchent annuellement la Grande-Ile). Quant aux rendements des cultures, dans le contexte étudié, une absence de différence significative est constatée entre les deux systèmes comparés (SDm vs LABe). Mais pour obtenir des informations plus fines sur l'effet des systèmes SDm sur les rendements des cultures à Madagascar, des études menées sur des milieux ayant des conditions pédoclimatiques contrastées seront fortement sollicitées.

## Références

- [1] - FAOSTAT (<http://faostat.fao.org/>), in Rapport spécial : mission FAO/PAM d'évaluation de la sécurité alimentaire à Madagascar (octobre 2013).
- [2] - [www.banquemondiale.org/fr/country/madagascar](http://www.banquemondiale.org/fr/country/madagascar) (2012).
- [3] - P. SEGALIN, « *Les sols ferrallitiques, en Afrique et en Extrême-Orient, Australie, Océanie. Conclusions Générales* », Etudes et Thèses, ORSTOM, Paris, Tome 3, 204 pages (1995).
- [4] - J. P. RAISON, « *Les Hautes Terres de Madagascar et leurs confins occidentaux* ». Paris, ORSTOM KARTHALA, 2t, 605pages (1984).
- [5] - E. RAMANANKASINA and L. RABEHARISOA, « La terre, un héritage à bien gérer ». Actes du Colloque scientifique international « Sol, environnement et développement » organisé dans le cadre de la célébration du centenaire de l'AcNALS (Académie Nationale des Arts, des Lettres et des Sciences), (49), (2003), 43-50.
- [6] - B. MINTEN and E. RALISON, « Environnement, agriculture et pauvreté ». In: *Agricultures, pauvreté rurale et politiques économiques à Madagascar* : Randrianarison L. (Ed.). (2003).

- [7] - C. M. COUGHENOUR and S. CHAMALA, «Conservation tillage and cropping innovation. Constructing the new culture of agriculture». Ames (USA): Iowa State University Press, (2000).
- [8] - O. HUSSON and RAKOTONDRAMANANA, « Voly rakotra : Mise au point, évaluation et diffusion des techniques agro-écologiques à Madagascar ». Articles et posters présentés au troisième congrès mondial d'agriculture de conservation, Nairobi, Kenya, Groupement Semis Direct de Madagascar, 67 pages, Octobre (2005).
- [9] - L. SEGUY, S. BOUZINAC, A. MARONEZZI, E. SCOPEL, J. L. BELOT and J. MARTIN, «The success of no tillage with cover crops for savannah regions from destructive agriculture with soil tillage to sustainable agriculture with direct seeding mulch based systems: 20 years of research of Cirad and its brazilian partners in cerrados in Brazil». In "II Congresso Mundial sobre Agricultura conservacionista", Ponta Grossa, Brazil, (2003).
- [10] - F. REY, J.L. BALLAIS, A. MARRE and G. ROVERA, «Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface», Geoscience de surface, (336), (2004), 991-998.
- [11] - T. RAZAFIMBELO, A. ALBRECHT, I. BASILE, D. BORSCHNECK, G. BOURGEON, C. FELLER, H. FERRER, R. MICHELLON, N. MOUSSA, B. MULLER, R. OLIVER, C. RAZANAMPARANY, L. SEGUY and M. SWARC, «Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale sur le stockage du carbone dans un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar», Etude et Gestion des sols, (13), (2), (2006), 113-127.
- [12] - A. FINDELING, S. REY and E. SCOPEL, « Modeling the effects of partial residue mulch on runoff using a physically based approach», J.Hydrol, (275), (2003), 49-66.
- [13] - E. SCOPEL, J. M. DOUZET, F.A. MACENA DA SILVA, A. CARDOSO, J.A. MOREIRA, A. FINDELING and M. BERNOUX, « Impacts des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur la dynamique de l'eau, de l'azote minéral et du carbone du sol dans les Cerrados brésiliens ». Cahiers Agricultures, (14), (2005), 71-75.
- [14] - E. BLANCHART, M. BERNOUX, X. SARDA, M. SIQUEIRA NETO, C. C CERRI, M. PICCOLO, J. M. DOUZET, E. SCOPEL and C. FELLER, « Effect of direct seeding mulch-based systems on soil carbon storage and macrofauna in Central Brazil », Agriculture Conspectus Scientificus, (72), (1), (2007), 81-87.
- [15] - B. RABARY, S. SALL, P. LETOURMY, O. HUSSON, E. RALAMBOFETRA, N. MOUSSA and J. L. CHOTTE, « Effects of living mulches or residue amendments on soil microbial properties in direct seeded cropping systems of Madagascar », Applied soil Ecology, (39), (2008), 236-243.
- [16] - Collectif SOL-SCV, « Sols tropicaux, pratiques SCV, Service éco systémique », acte de séminaire international sur le SCV à Antananarivo, (2008), 39 pages.
- [17] - M. C. PEEL, B. L. FINLAYSON and T. A. MCMAHON, « Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification », Hydrology and Earth System Sciences, (11), (2007), 1633-1644.
- [18] - World reference base for soil resources, « International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps », World Soil Resources Reports N°106. FAO, Rome. 181 pages (2014).
- [19] - N. W. HUDSON, « Field measurement of soil erosion and runoff », FAO soils bulletin, N °68, 139 pages (1993).
- [20] - C. D. BONHAM, « Measurements for Terrestrial Vegetation », John Wiley and Sons, New York, USA, 352 pages (1989).
- [21] - J. GUTIERREZ and I. I HERNANDEZ, « Runoff and interrill erosion as affected by grass cover in a semi-arid rangeland of northern Mexico », Journal of Arid Environments, (34), (1996), 287-295.
- [22] - P. LEVANG and M. GROUZIS, « Méthode d'étude de la biomasse herbacée des formations Sahéliennes: application à la Mare d'Oursi, Haute-Volta », Acta Oecologica, Oecol. Plant, 1(15), (3), (1980), 231-244.
- [23] - W. D. KEMPER and R. C. ROSENEAU, « Aggregate stability and size distribution », In A. Klute (édition) "Methods of soil analysis". Part, 2ème édition. Agronomie Monograph, 425-441 (1986).
- [24] - P. DAGNELIE, « Théorie et méthodes statistiques », 463 pages (1975).
- [25] - R. LAL, « Soil erosion on alfisols in Western Nigeria: I. Effects of slope, crop rotation and residue management », Geoderma, (16) (5) (1976), 363-375.

- [26] - E. ROOSE, « *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCEJ)* » Bulletin pédologique de la FAO, Vol 70, 420 pages, (1994).
- [27] - B. BARTHÈS and E. ROOSE, « *Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels* », Catena, (47), (2002), 133-149.
- [28] - K. JIN K, W.M. CORNELIS, D. GABRIELS, W. SCHIETTECATTE, D. DE NEVE, J. LU, T. BUYSSE, H. WU, D. CAI, J. JIN and R. HARMANN, « *Soil management effects on runoff and soil loss from field rainfall simulation* », Catena, (75), (2008), 191-199.
- [29] - J. A. GÓMEZ, T. O. SOBRINHO, J. V. GIRÁLDEZ and E. FERERES, « *Soil management effects on runoff, erosion and soil properties in an olive grove of Southern Spain* » Soil & Tillage Research, (102), (2009), 5-13.
- [30] - A. FINDELING, S. RUY and E. SCOPEL, « *Modeling the effects of partial residue mulch on runoff using a physically based approach* », J. Hydrol, (275), (2003), 49-66.
- [31] - K. P. C RAO, T. S. STEENHUIS, A. L. COGLE, S. T. SRINIVASAN, D. F. YULE and G. D SMITH,, Rainfall infiltration and runoff from an Alfisol in semi-arid India. I. No-till systems. Soil Till. Res. (48), (1998), 51-59.
- [32] - J. G. MCIVOR, J. WILLIAMS and C. J. GARDENER, « *Pasture management influences runoff and soil movement in the semi-arids tropics* », Australian Journal of Experimental Agriculture, Vol 35, (1995), 55-65.
- [33] - D. J. SNELDER and R. B. BRYAN, « *The use of rainfall simulation tests to assess the influence of vegetation density on soil loss on degraded rangelands in the Baringo District, Kenya* », Catena, vol. 25 (1995), 105-116.
- [34] - K. JIN, W. M. CORNELIS, D. GABRIELS, M. BAERT, H. J. WU, W. SCHIETTECATTE, D. X. CAI, S. DE NEVE, J. Y. JIN, R. HARTMANN and G Hofman, « *Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses* », Catena, 78, (2009) 81-86.
- [35] - G. SANJARI, B. YU, H. GHADIRI, C. A. A. CIESIOLKA and C. ROSE, « *Effects of time-controlled grazing on runoff and sediment loss* », Australian Journal of Soil Research, (47), (2009) 796-808.
- [36] - J. M. DOUZET, E. SCOPEL, B. MULLER, J. RAKOTOARISOA, A. ALBRECHT and N. C. RAZAFINDRAMANANA, « *Effets des systèmes de cultures en semis direct avec couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des cultures pluviales des Hautes-terres de Madagascar* », Étude et Gestion des Sols, 17, (2) (2010), 131-142.
- [37] - D. MANDAL, K. S. DADHWAL, O. P. S KHOLA, and B. L. DHAYNI, « *Adjusted T values for conservation planning in Northwest Himalayas of India. Journal of Soil and Water Conservation* », (61), 6, (2006), 391-397.
- [38] - J. RAKOTOARISOA, R. OLIVER, J. DUSSERRE, B. MULLER, J.-M. DOUZET, R. MICHELLON, N. MOUSSA, L. A. RAZAFINJARA, C. RAJERARISON and E. SCOPEL, « *Bilan de l'azote minéral au cours du cycle du riz pluvial sous-systèmes de culture en semis direct sous couverture végétale en sol ferrallitique argileux à Madagascar* », Étude et Gestion des Sols, 17 (2) (2010) 169-186.
- [39] - G. BRUELLE, « *Pertinence de l'agriculture de conservation pour tamponner les aléas climatiques: cas des systèmes de culture en riz pluvial au Lac Alaotra, Madagascar* », Thèse, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques-Université d'Antananarivo-Montpellier SupAgro, 92 pages (2014).
- [40] - E. PENOT and T. ANDRIATSITOHAINA, « *Savoirs, pratiques, innovations et changement de paradigme de l'agriculture dans la région du lac Alaotra (Madagascar)* » Géoconfluences.(Dossier Afrique subsaharienne, territoires et conflits), (2011).